29108
DUP

REVUE DES PROGRES ACCOMPLIS EN INSPECTION THERMOGRAPHIQUE

IGM88RT-404-759-G
CNRC 29108

REVUE DES PROGRES ACCOMPLIS EN INSPECTION THERMOGRAPHIQUE

1987 - 1988

Xavier Maldague

24 juillet 1988

A - Introduction

Notre travail s'attache à l'élaboration de procédés, traitements et modélisation appliqués à l'évaluation non destructive des matériaux et structures au moyen de la thermographie infrarouge. Au cours de la dernière année nous avons porté notre attention à la mise au point d'un système d'inspection thermographique. Nous avons également employé ce système pour l'évaluation des matériaux. Parallèlement, un capteur thermique fonctionnant dans le proche infrarouge a été construit pour la mesure de hautes températures (880 - 1300°C). Nous allons exposer, sans entrer dans les détails, ces diverses activités.

B - Inspection thermographique: le système d'acquisition

B-1 Introduction

Les applications de la thermographie infrarouge sont nombreuses, citons: l'entretien des édifices et des ouvrages d'art, la surveillance aérienne, l'étude du traffic routier, la détection de points chauds sur les circuits imprimés, le contrôle du laminage et du soudage, l'analyse des polymères, la détection et la caractérisation de défauts dans les matériaux composites. Ces derniers aspects de thermographie 'active' et 'passive' formeront le cadre de notre exposé.

La thermographie 'passive' se contente de mesurer la radiation émise sans chercher à la perturber. Il s'agira par exemple de vérifier le bon fonctionnant d'isolateurs de câbles à haute tension en pointant simplement la caméra infrarouge vers ceux-ci.

A l'origine de l'inspection des matériaux au moyen de la thermographie 'active', on retrouve les différences de propriétés thermiques au sein des pièces à inspecter. Si, par exemple, une courte impulsion de chauffage est appliquée à une surface, son équilibre thermique sera rompu faisant apparaître après un certain temps, des zones ayant des températures différentes, zones révélant la présence, sous la surface, de structures possédant des résistances thermiques différentes au passage du flux thermique. Ces différences de température ou contraste, sont enregistrées par le système d'imagerie thermique ce qui permet, après analyse, la détection de défauts et la caractérisation des matériaux.

Avant d'aborder plus directement le sujet, il nous semble utile de présenter quelques rappels de radiométrie. Le spectre électromagnétique est divisé arbitrairement en régions que l'on peut distinguer par les méthodes employées pour capter et produire les radiations. La thermographie emploit le spectre infrarouge qui s'étend de 0.75 à 100 µm.

Notons que le spectre visible s'étend de 0.35 µm (bleu) à 0.75 µm (rouge).

Différents type de détecteurs sont disponibles tels les bolomètres (thermistors), les thermopiles (thermocouples), les détecteurs pyroélectriques (tubes vidicon), les détecteurs pneumatiques, les détecteurs quantiques. Nous avons à l'IGM une caméra suédoise AGEMA 782 SW munie d'un détecteur quantique photoconducteur InSb (antimoine d'indium) sensible dans la plage 3 à 5 µm et qui produit une tension proportionnelle aux photons reçus. Pour limiter le bruit thermique ce détecteur doit être refroidi a 77 K (-196°C) avec de l'azote liquide . La radiation incidente arrive au focus sur le détecteur en passant par l'optique d'entrée (objectif de germanium de 12°) et par deux prismes dont la rotation combinée forme l'image.

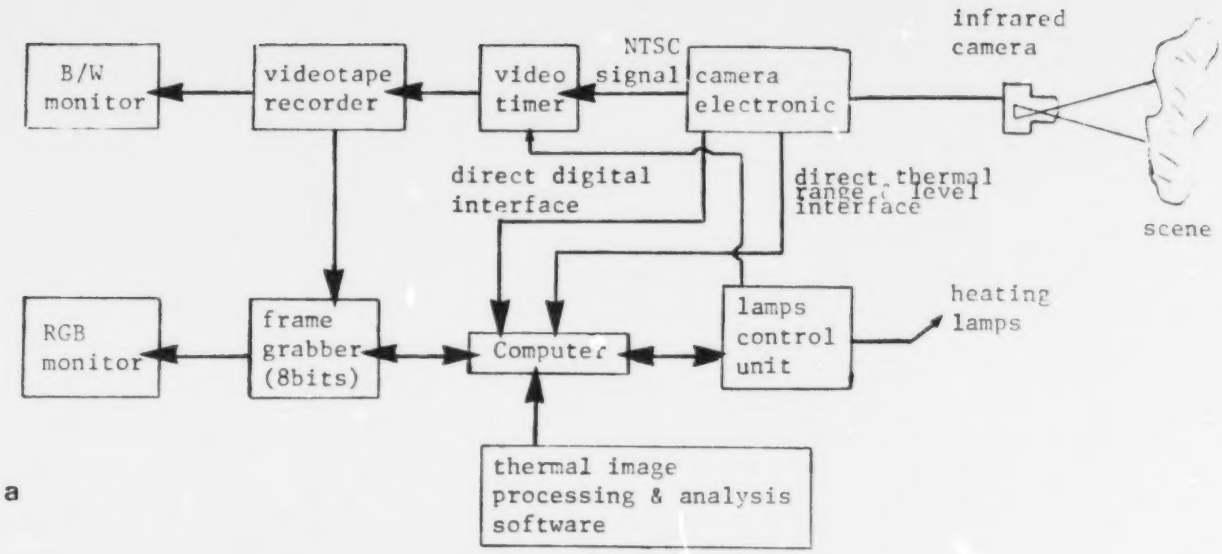
B-2 Survol du système d'acquisition: les images

La figure 1 présente un schéma du système d'acquisition. Le signal vidéo brut issu de la caméra est converti en un signal vidéo conforme au standard RS-170 et est simultanément numérisé à la cadence de 3.8 images par seconde sur 8 bits par le Scan Converter 700 de ViewScan Ltd, Concord. ONT. De cet appareil, deux voies sont donc possibles: l'enregistrement numérique direct sur l'ordinateur PC Panama 386 d'Ogivar, Ville St-Laurent par un port parallèle ou l'enregistrement du signal vidéo analogique sur ruban magnétoscopique avec superposition de l'instant d'acquisition grâce à un chronomètre vidéo FOR-A. Après une expérience, les images peuvent être récupérees du magnétoscope et numérisées dans le PC à l'aide d'une carte vidéo 8 bits PIP-1024 de Matrox, Dorval.

La voie analogique effectue l'enregistrement à la cadence de 30 images / s ce qui permet de conserver la trace d'événements fugitifs. Pour assurer la reproduction fidèle des niveaux absolus des images indépendemment du CAG (contrôle automatique de gain qui règle le niveau d'amplification d'une image à partir du niveau moyen de celle-ci), une échelle de niveaux de gris est enregistrée simultanément sur chaque image.

Nos images sont 'petites' par rapport à des images vidéos standard: 68 lignes sur 105 colonnes soit 7K octets. Des tests que nous avons effectués nous ont montré que le magnétoscope avait une plage dynamique suffisante (≈ 48 dB) compte tenu de la largeur de bande requise (≈ 220 K octets) pour la transmission fidèle des images et leur numérisation sur 8 bits. Toutefois l'emploi du magnétoscope n'est pas idéal puisque le transfert des images au PC doit se faire en temps différé après coup et une par une, ce qui retarde d'autant l'analyse des images.

a



b

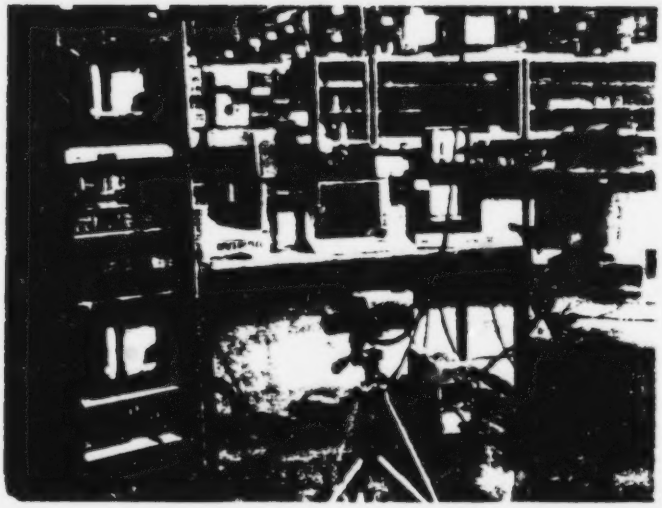


figure 1 Schéma du système d'acquisition (a) et photo de la station d'inspection (b).

La voie numérique (transfert direct des images au PC) est préconisée puisqu'on s'affranchi des éventuelles distorsions causées par le magnétoscope ainsi que du traitement requis pour retrouver les niveaux absolus des images. En outre, le transfert se fait en direct sans intervention manuelle. Il est lent cependant (3.8 images / s).

Compte tenu de la capacité limitée du 'RAM-disque' du PC, on doit restreindre le nombre d'images acquises à 288 ce qui nous à amené à réaliser un système automatique d'acquisition qui se déclenche avec le début du chauffage et procède à l'acquisition des images dans des zones temporelles prédéfinies selon une échelle logarithmique.

L'emploi d'une échelle logarithmique permet de suivre l'évolution en température: changements rapides au début puis très lents vers la fin ce qui nécessite un moyennage temporel pour limiter le bruit.

B-3 Survol du système d'acquisition: niveau thermique des images

De façon à couvrir une plage donnée de température, la caméra AGEMA possède deux réglages: le 'level' et le 'range'. Le 'range' fixe la largeur de la plage de température observable sans saturation. Le 'level' ou niveau thermique, fixe le milieu de la plage de température. La résolution maximale sera obtenue pour le 'range' le plus petit.

Si une mesure de température absolue est nécessaire, il faudra donc faire l'acquisition simultanée des images (section B-2) et du 'level' thermique. Un système a été réalisé pour cela. Le signal analogique correspondant au 'level' est conditionné pour s'adapter à une carte d'acquisition A/N Dash-8 de Metrabyte, Taunton, Mass. de 12 bits montée dans le PC. Lors de l'acquisition, un moyennage est effectué et les valeurs sont enregistrées au $1/100^{e}$ de seconde. Le fichier des valeurs du 'level' est ensuite lissé (avec une fonction gaussienne glissante) pour supprimer le bruit hautes fréquences. Cette dernière étape est très importante puisque le 'level' sert lors de la conversion en température.

B-4 Survol du système d'acquisition: calibration et calcul de température

Le système de prismes rotatifs avec détecteur unique employé pour la formation des images crée des effets de bord qui, conjugués avec la réflexion de l'image du détecteur froid (dewar) sur l'optique d'entrée au centre de l'image, produit une distorsion du champ de vision. Cette distorsion est encore plus apparente lorsqu'une bague est insérée entre l'objectif et le boîtier de la caméra pour réduire le champ

de vision et obtenir une meilleure définition spatiale. La température interne de la caméra influence également le signal, il faut donc attendre que celle-ci se soit stabilisée avant d'obtenir des lectures répétitives (délai de 2 à 3 heures après l'allumage).

Nous avons donc entrepris une calibration spatiale de la caméra. Cette calibration a été effectuée à différentes températures et différents 'level' ce qui a permis de caractériser le système au complet. Sans entrer dans les détails et à titre d'exemple, la figure 2 montre une image thermique d'une cible uniforme (à 22.7°C) avec et sans correction des distorsions spatiales. Notons que les variations maximales dans l'image calculée en température et corrigée sont faibles de l'ordre de 0.68°C par rapport à 1.78°C pour l'image non corrigée.

B-5 Survol du système d'acquisition: les logiciels

Pour le bon déroulement des expériences, l'ensemble des opérations est régi par une famille de logiciels. Nous avons opté pour la séparation des tâches en différents programmes par souci de simplicité et aussi pour tenir compte des limitations de l'architecture du PC telle l'absence de mémoire virtuelle (la mémoire est segmentée plutôt). Toutefois l'emploi des commandes de redirection du DOS (système d'opération) et de 'batch files' (petits fichiers contenant des listes séquentielles de tâches à accomplir) permet de lier entre eux tous les logiciels et de réaliser, par exemple, une acquisition suivie d'un dépouillement des données et affichage des résultats avec un minimum d'intervention (toutes les commandes et les réponses à fournir étant alors incluses dans une 'batch file'). La figure 3 présente un aperçu des logiciels nécessaires au fonctionnement de la station d'inspection. La plupart sont écrits en "C" avec toutefois quelques modules en Pascal. Le programme d'acquisition des images est entièrement écrit en assembleur pour maximiser la vitesse d'exécution.

Le temps d'acquisition de chaque image est codé dans son nom ce qui est pratique, D_902.UC correspond ainsi à l'image acquise à l'instant t = 9.02s après le déclenchement de l'acquisition (le barycentre de l'impulsion de chauffage correspond à t = 0s).

Chaque expérience possède son propre répertoire et un ensemble de 'batch files' permet d'accéder et de gérer celles-ci facilement. Un fichier spécial contient le numéro de l'expérience courant. Puisque tous les programmes s'y réfèrent, il suffit de modifier ce seul fichier pour travailler sur telle ou telle expérience.

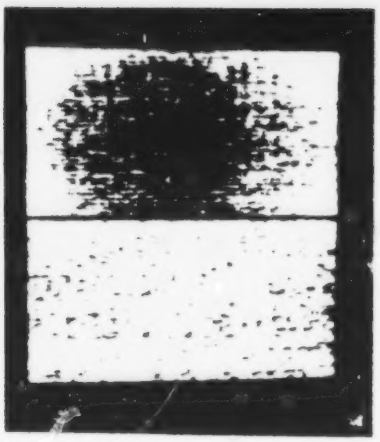


figure 2 Thermogramme brut (a) et calculé en température (b) pour une cible uniforme de 22.7°C. Les distorsions spatiales de l'image brute sont corrigées par la calibration en température: 0.68°C d'écart maximum après correction par rapport à 1.78°C avant.

fonction	programme	fichiers
acquisition des images:	- FAST.ASM - DECORTIQ.C	images D_x.UC
acquisition du level:	- LEVEL.C	LEVEL.DIS
lissage du level:	- LISLEVEL.C	
préparation de l'expérience et affichage des résultats:	- DIS.C	STATUT.DIS ZONE.DIS
lissage des résultats (contrastes, gradient):	- NLISSE.C	
calculs préliminaires:	- DISM3.C	MATRESUL.DIS COEFTEMP.DIS* A_IJ.DIS* R_IJ.DIS*
calcul du contraste:	- CONTRASTE.C	CONTRAST.DIS
calcul des contours:	- SOMMET.C	FOV_XY.DIS

(*): fichiers de calibration

figure 3 Agencement des principaux logiciels.

Tous les résultats graphiques ainsi que les images peuvent être affichés sur le moniteur couleur (RGB), l'imprimante à points (affichage noir sur blanc ou en demi-ton) ou sur une imprimante à jets d'encre.

C - Évaluation non destructive (END) des matériaux

C-1 Introduction

Comme principaux attraits de l'END par thermographie, citons l'absence de contact avec la pièce à inspecter outre l'échauffement de quelques degrés, la possibilité de balayer de grandes surfaces rapidement (jusqu'à $1 m^2/s$), l'absence de contrainte pour la localisation du senseur (ce qui est pratique quand des objets aux géométries complexes doivent être inspectés où lorsque l'accès n'est possible que d'un côté). Au point de vue sécurité, il n'y a aucune émission de radiation dangereuse. La détection est cependant limitée à des défauts peu profonds et l'analyse quantitative rigoureuse n'est pas facile à mettre en oeuvre. La thermographie est donc une technique idéale pour effectuer un tri: acceptation / rejet quitte ensuite à employer d'autres techniques d'END pour la détection fine (ultrasons, rayons X, EMAT, courants de Foucault, ...). Notre étude a néanmoins deux orientations: l'évaluation qualitative pour déterminer s'il y a un (des) défaut(s) et si oui, la détection quantitative qui est possible par thermographie.

Deux approches sont employées pour le chauffage des pièces (c.f. section B-2): un chauffage global avec pièce fixe ou bien un chauffage linéaire associé au déplacement latéral des composants à inspecter. La première approche est appropriée pour des pièces de petites dimensions alors que la seconde s'adresse à des composants de dimensions plus étendues.

Dans les sections qui suivent nous allons présenter des exemples d'applications de la technique thermographique élaborée à l'IGM, nous n'entrerons pas dans les détails, référant plutôt le lecteur aux publications mentionnées en annexe.

C-2 END thermographique quantitative de composés de graphite-époxy

L'emploi de pièces de graphite-époxy se généralise de plus en plus notamment dans l'industrie aérospatiale à cause de la rigidité et de la légèreté qui peuvent être obtenues. Ces nouveaux matériaux sont de bons candidats pour l'investigation par thermographie infrarouge. D'une part les défauts critiques qui doivent être absolument décelés sont

situés en surface, d'autre part leur émissivité naturelle est élevée.

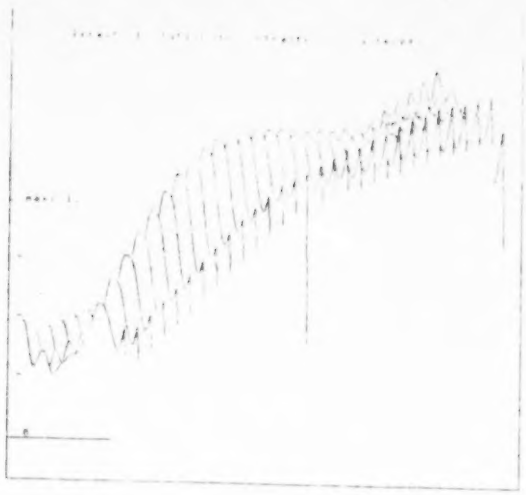
L'émissivité ε concerne la capacité d'une surface d'émettre de l'énergie. L'émissivité ε est liée à la réflectivité R (propriété d'une surface de réfléchir de l'énergie) puisque, pour une longueur d'onde donnée, leur somme est égale à 1. Ainsi pour un miroir lambertien parfait $\varepsilon=0$, $R=1$; une caméra infrarouge pointée vers celui-ci ne pourra mesurer sa température, on mesurera plutôt la température des objets environnants. Il est donc important, pour une mesure de température exacte, de s'affranchir au maximum de ces réflexions parasites et de s'assurer d'une émissivité élevée.

Parallèlement à la mise au point du système d'acquisition, des modèles théoriques bidimensionnels ont été élaborés de façon à pouvoir quantifier les résultats obtenus.

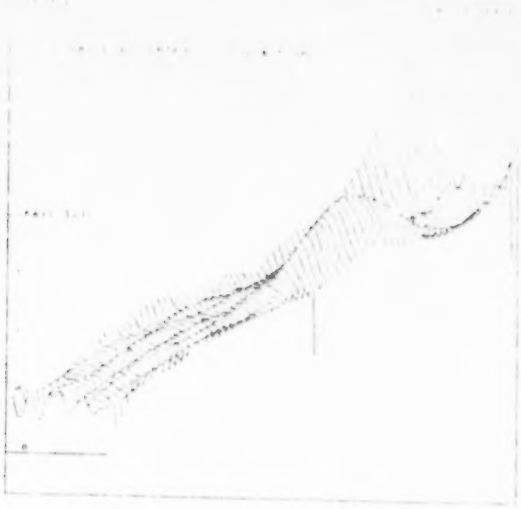
Pour simplifier le problème, des tests ont d'abord été effectués sur des plaques de plexiglas dans lesquelles des trous (défauts simulés) ont été percés à différentes profondeurs sous la surface. Comme le plexiglas est un matériau isotrope (conductivité thermique identique dans toutes les directions), l'analyse est simplifiée. Une bonne corrélation ($\approx$ 10%) entre les mesures et le modèle a été établie. Notons que la conductivité thermique du plexiglas n'était connue qu'à un facteur de 10% près.

Des tests ont été ensuite effectués sur des échantillons de graphite-époxy dans lesquels des implants de téflon de différents diamètres, insérés entre les couches, simulent la présence de délaminations. Cette situation est plus complexe que la précédente puisqu'il faut maintenant tenir compte de l'anisotropie (conductivité parallèle aux fibres différente de la conductivité perpendiculaire à celles-ci), et du flux thermique autour du défaut. Les résultats sont, jusqu'à présent, moins bons que dans le cas du plexiglas, nous continuons toutefois notre investigation et espérons améliorer les correspondances.

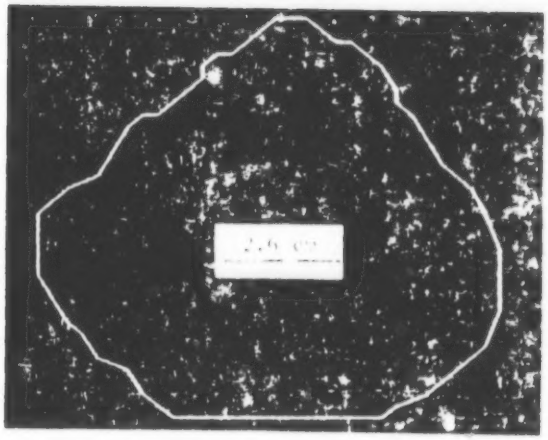
La procédure expérimentale se décompose en trois étapes: 1°- calcul de l'évolution du contraste au dessus du défaut en fonction du temps (ce qui nous donne la profondeur du défaut) 2°- calcul du contraste sur les images de la zone temporelle (c.f. B-2) correspondant à l'instant où celui-ci est maximum 3°- calcul du gradient et extraction du contour. Un exemple est présenté à la figure 4. L'échantillon est fixe, le chauffage consiste en une rosette de 6 lampes (de 1000 W) ou bien un élément chauffant (20 x 30 cm) de 2500 W qui se déplace latéralement sur une glissière, en face du panneau (figure 5-a).



a



b



c

figure 4 Étapes pour l'évaluation quantitative d'un défaut dans un laminé de graphite-époxy (délamination de 1 mm de profondeur et ⌀ 10 mm):
(a) évolution temporelle du contraste thermique au-dessus du défaut pour le calcul de la profondeur.
(b) calcul du contraste thermique sur une image complète lorsque celui-ci est maximum. Les déformations dans le coin sont dues à l'inhomogénéité du chauffage.
(c) évaluation du contour par différenciation de l'image (b).

C-3 END thermographique de laminés d'aluminium

Une technique d'END rapide comme la thermographie est particulièrement utile lors de la production de laminés d'aluminium (aluminium collé sur aluminium, aluminium collé sur mousse) qui sont employés dans l'industrie des transports (e.g. fabrication de boîtes de camions frigorifiques). Étant donné la conductivité radiale élevée le long de la peau d'aluminium comparativement à la conductivité thermique plus faible de l'adhésif et du centre de mousse, l'inspection thermographique est limitée aux délaminations relativement grandes et peu profondes. L'industrie s'intéresse surtout à la détection de défauts de collage, l'évaluation de la profondeur est superflue puisqu'il s'agit de l'épaisseur de la peau d'aluminium.

Le problème majeur de l'inspection thermographique est ici la faible émissivité de l'aluminium (c.f. section C-2). Sans autre procédé, l'inspection serait impossible. On peut toutefois recouvrir les panneaux d'aluminium d'une peinture dont l'émissivité est élevée ce qui résoud le problème. Cette peinture peut servir de couche de fond ou bien, si elle est soluble dans l'eau, simplement l'enlever au moyen de jets d'eau.

Tel qu'illustré à la figure 5, on peut recourir à la configuration fixe ou mobile. Dans le cas d'échantillons minces, une technique en transmission où le chauffage se fait du côté opposé à la détection est possible (fig. 6). Nous allons illustrer la méthode par quelques exemples.

A la figure 7, on présente le résultat de l'inspection d'un panneau composé d'un centre de mousse recouvert de deux plaques d'aluminium (noircies) et collées à l'époxy. Un défaut de collage a été simulé par l'absence d'époxy sur une zone triangulaire. Une technique de soustraction spatiale a été utilisée pour accroître la visibilité du défaut. Un échantillon sain (fig 7-a) est d'abord testé (configuration fixe, en réflexion, radiation lumineuse incidente: 1 W/cm^2 pendant 1 s, champ de vision 19x19 cm). Ensuite le panneau à inspecter est traité de la même façon (fig. 7-b). En effectuant la soustraction des 2 images enregistrées 2.5 s après le début du chauffage, on s'affranchit des inhomogénéités de la distribution thermique à la surface qui nuisent à la détection du défaut. L'instant d'acquisition pour une visibilité optimale est obtenu à partir du modèle thermique. Ce procédé, simple à mettre en oeuvre est pratique pour simplement repérer la position des anomalies internes.

Pour accroître la cadence d'inspection de panneaux de grandes dimensions, la configuration mobile est plus appropriée. Cette fois une lampe filiforme (2500 W) munie d'un réflecteur est employée pour le chauffage et les panneaux

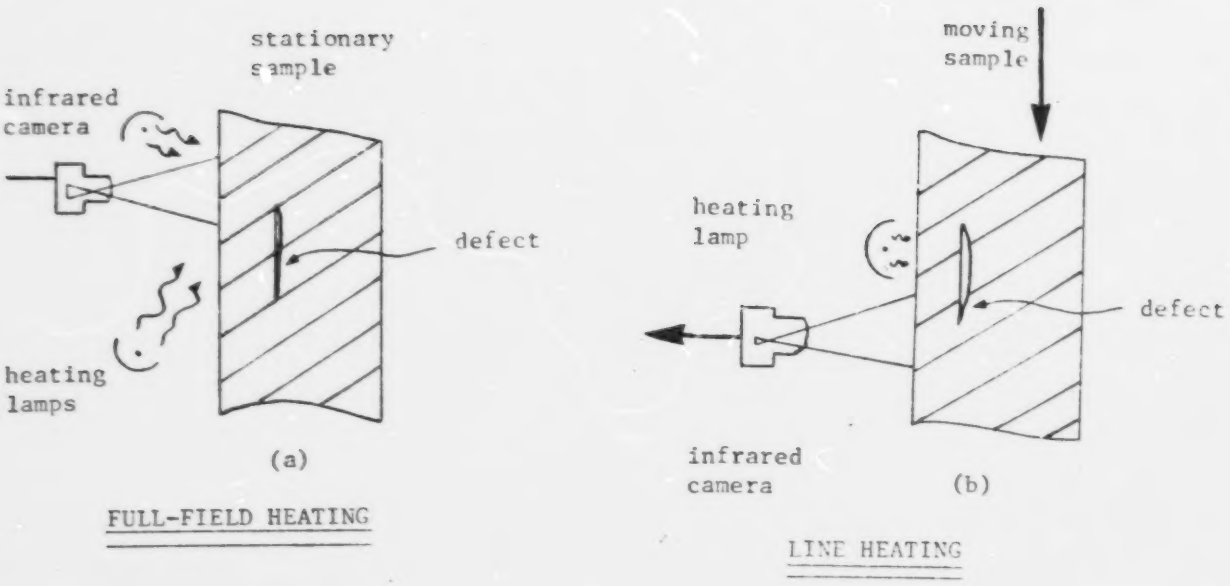


figure 5 Principe d'inspection thermographique en réflexion selon une configuration fixe (a) ou mobile (b).

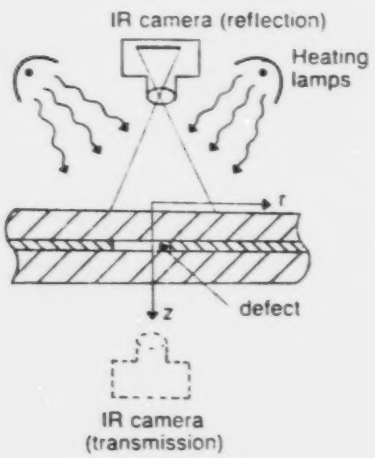


figure 6 Principe d'inspection thermographique en réflexion ou en transmission.

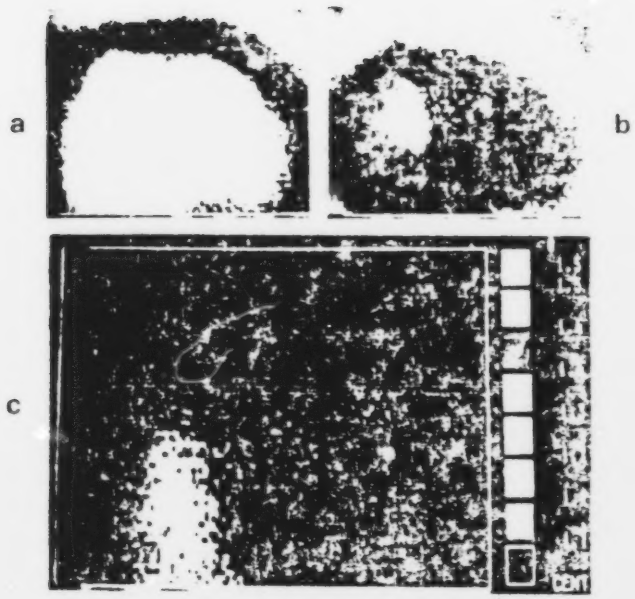


figure 7 Inspection d'un laminé d'aluminium:
(a) image brute au-dessus du défaut
(b) image brute au-dessus d'une zone saine
(c) soustraction spatiale (a) - (b) révélant le défaut de collage de forme triangulaire.

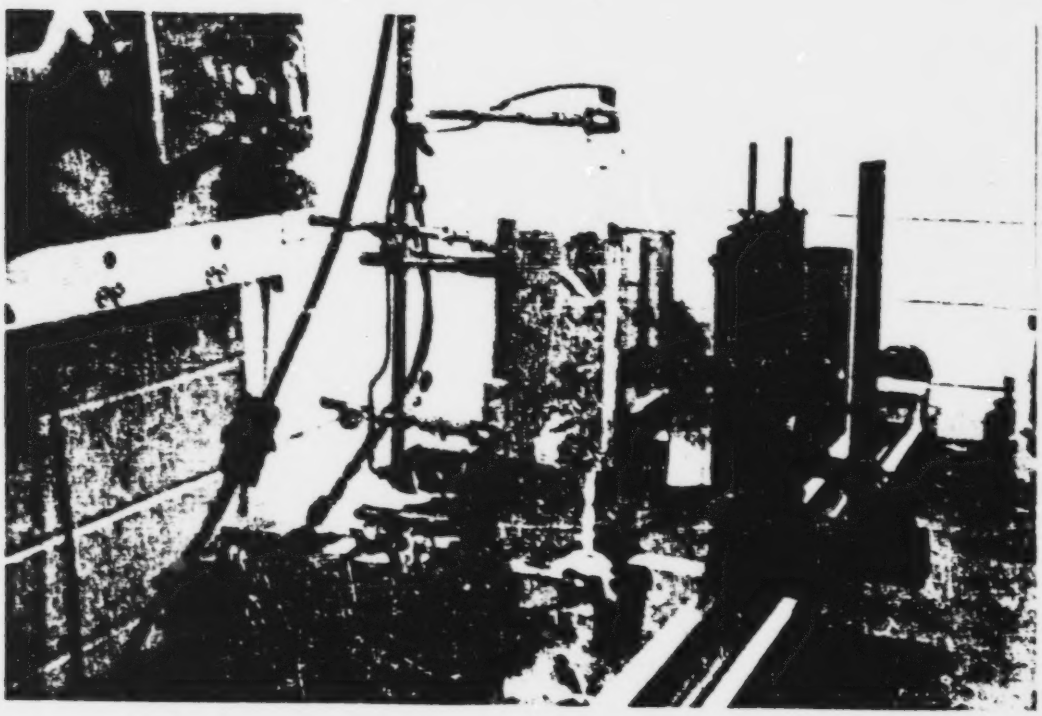


figure 8 Photo du montage expérimental (configuration mobile en réflexion). On distingue la lampe filiforme de chauffage à gauche et le laminé à inspecter monté sur glissière à droite.

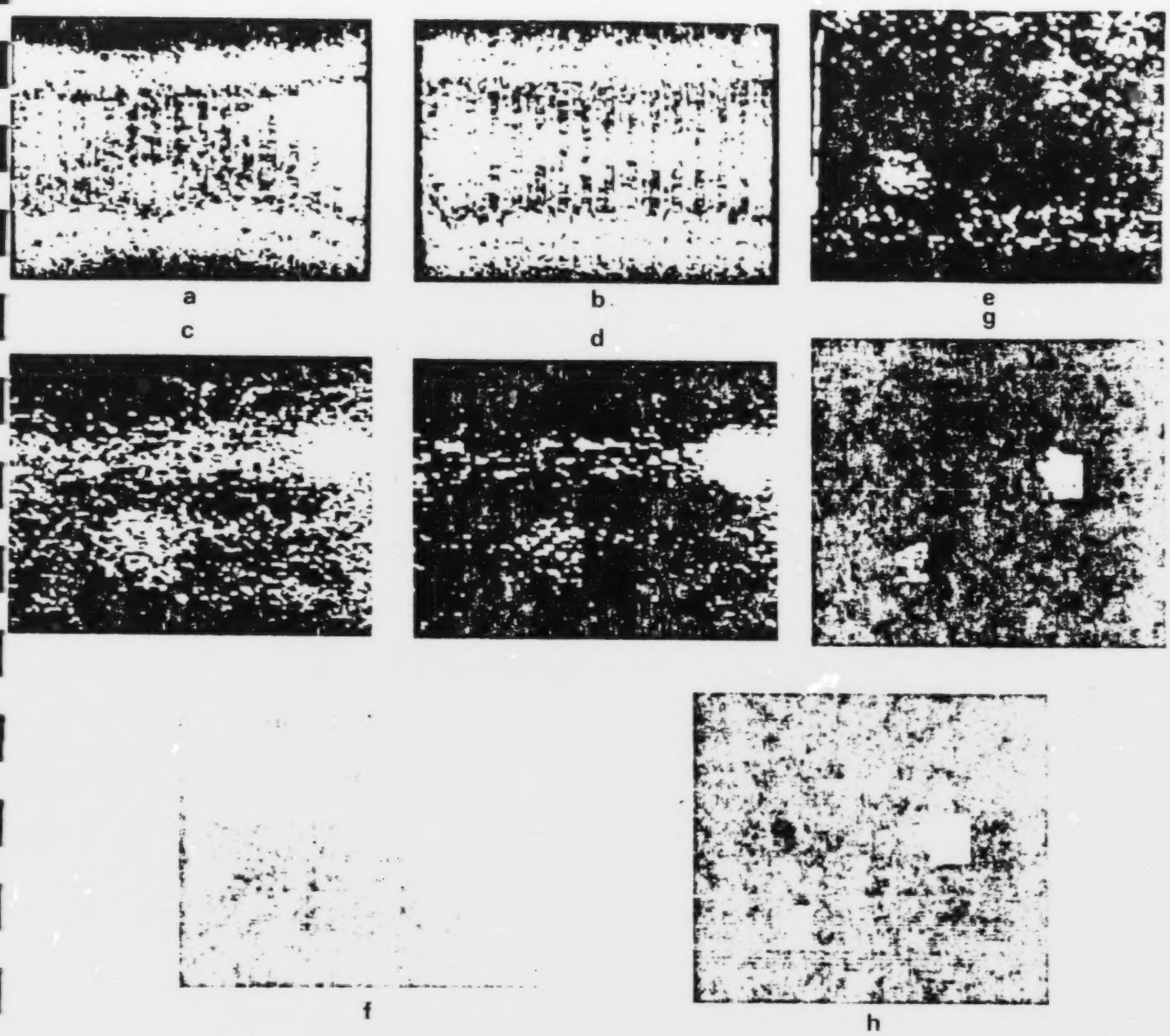


figure 9 Etapes du traitement d'images dans le cas d'un laminé d'aluminium:
Images brutes enregistrées à t = 3.04 s après le début du chauffage:
(a) au-dessus du défaut.
(b) au-dessus d'une zone saine.
(c) = (a)-(b), 2 défauts sont visibles malgré le bruit.
(d) image binaire de (c).
(e) image binaire à t = 3.33 s, obtenue selon les mêmes étapes que pour (d).
(f) de (d) et (e), localisation grossière des 2 défauts grâce au déplacement de ceux-ci dans le champ image.
(g) suppression du bruit par érosion.
(h) reconstitution des défauts par gonflage.

sont montés sur une glissière mobile (fig. 5-b et 8). Un algorithme spécial a été mis au point à partir du pricipe suivant: la répartition du bruit dans les images est uniforme alors que les défauts recherchés se déplacent dans le champ de vision à cause du déplacement du panneau. En prenant des images à des instants différents, on peut donc maximiser la détection. La figure 9 illustre cette approche dans le cas d'un panneau de mousse et d'aluminium où des défauts de collage ont été simulés. La surface a été préalablement noircie pour accroître l'émissivité et éviter les réflexions parasites.

C-4 Résolution du problème de la faible émissivité

Cette nécessité de peindre la surface avant l'inspection par themographie n'est pas idéale puisqu'elle ralenti le procédé dont un des avantages est précisément la rapidité. Nous avons donc conçu un appareillage pour la détection des défauts internes dans les matériaux de faible émissivité par transfert d'empreinte thermique.

Il s'agit de transférer l'image thermique produite par la perturbation (chauffage ou refroidissement en réflexion ou en transmission, puisqu'un front froid se propage de la même façon qu'un front chaud), sur la surface de travail à un matériau de haute émissivité continuellement en contact avec celle-ci. L'image ainsi transférée est observée par la caméra infrarouge avec un minimum de bruit, bruit causé par les réflexions parasites des corps chauds avoisinants ou les variations d'émissivité de la surface réfléchissante.

Deux configurations sont possibles. La première (figure 10) emploit un rouleau de caoutchouc mousse déformable d'émissivité élevée pressé contre la surface métallique à inspecter, elle même montée sur glissière. Le chauffage par lampe filiforme, jet d'eau ou d'air chaud ou froid se réalise comme précédemment. La caméra thermique observe soit la surface de haute émissivité, soit la surface brillante où se réfléchit l'empreinte thermique transférée au rouleau. L'emploi d'une peinture n'est plus nécessaire. Puisque le rouleau de mousse est déformable, il peut s'adapter à des variations d'épaisseur. Cette configuration est limitée à la détection de défauts internes dont la profondeur est connue à l'avance (exemple: épaisseur de la peau d'aluminium) puisque l'instant d'acquisition est fixé dans le temps (position du rouleau capteur par rapport à l'unité de chauffage). En effet, l'instant t de visibilité maximale est lié à la profondeur z du défaut dans le matériau de diffusivité thermique α par la relation:

$$z = (\alpha t)^{1/2}$$

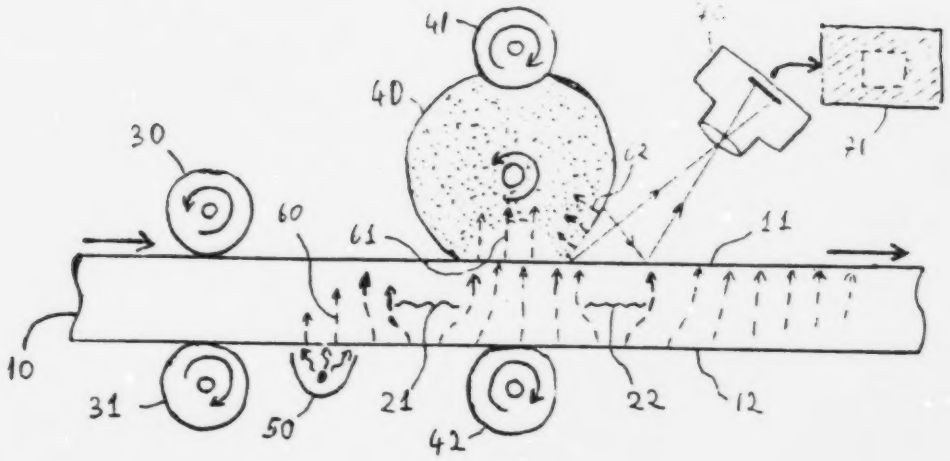
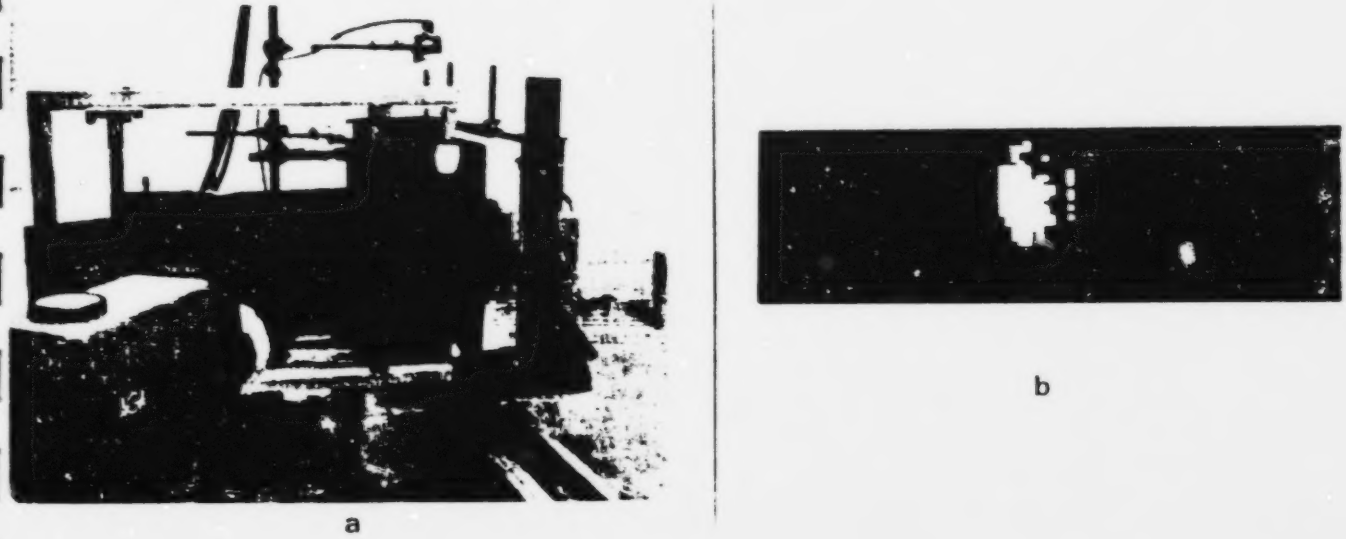


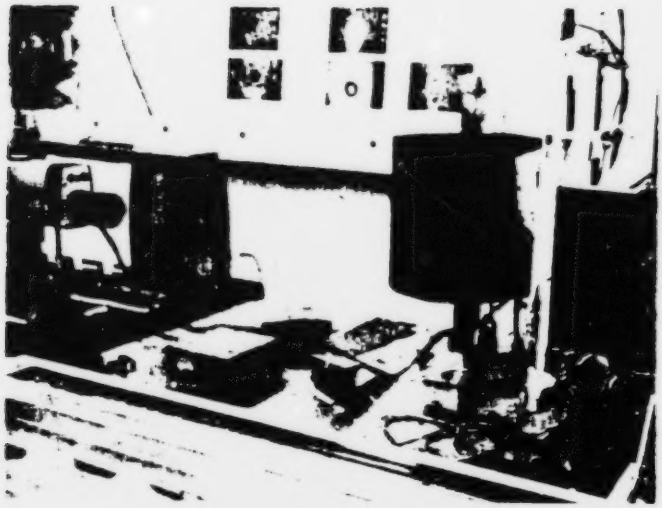
figure 10 Configuration pour l'inspection thermographique de structures de faible émissivité par transfert de l'empreinte thermique sur un rouleau flexible de haute émissivité.



a b

figure 11 (a) montage expérimental employant le principe illustré à la figure 10. Une courroie de caoutchou est employée pour éviter les problèmes d'accumulation de chaleur reliés à l'emploi d'un rouleau de faible diamètre qui ne se refroidit pas assez vite.
(b) résultat obtenu grâce à ce montage pour l'inspection d'un laminé d'aluminium. L'image binaire reconstituée montre un décollement (Φ 4 cm) . Largeur de la zone inspectée: 5 cm.

a



b

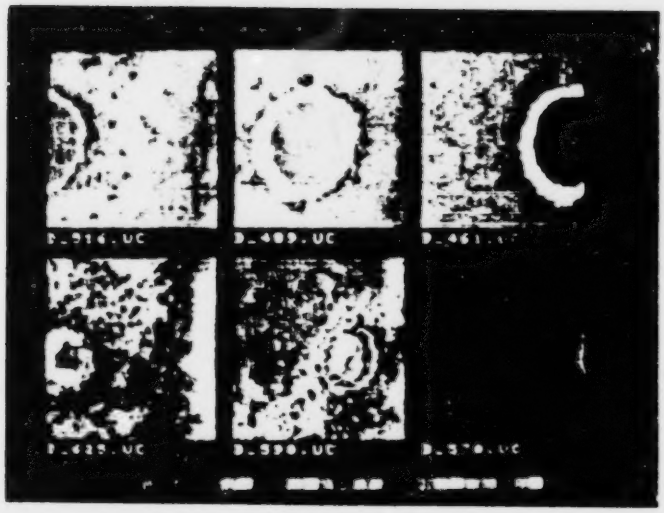


figure 12 (a) montage expérimental pour le transfert d'empreinte thermique employant un rouleau flexible.
(b) résultat typique obtenu sur un panneau de plexiglas. Le déplacement des défauts (trous) est bien mis en évidence.

Cette configuration a été testée d'abord avec un rouleau de caoutchou de faible diamètre (4 cm), la figure 11 montre un résultat typique et une photo de l'installation. Un autre montage employant un rouleau de mousse plus flexible (21 cm de diamètre) a ensuite été testé (figure 12). Le montage expérimental nécessite toutefois quelques améliorations avant d'être vraiment fonctionnel. Le principe est cependant démontré.

Lorsque des défauts peuvent être présents à différentes profondeurs, une autre configuration de transfert d'empreinte est possible. Cette fois, au lieu d'employer un rouleau, une pelure d'émissivité élevée est maintenue contre la surface à inspecter par capillarité au moyen de fins jets d'eau. La pelure fait office de peinture et les techniques exposées plus haut peuvent être alors déployées à loisir. Pour une inspection en continu, la pelure prend la forme d'une courroie qui repasse sans cesse devant la surface à inspecter (fig. 13). Cette fois cependant, la surface doit être tout à fait plane (à moins de mettre en place la pelure à l'avance) pour que le contact thermique reste parfait et pour éviter la formation de bulles d'air nuisibles à la détection. Un montage expérimental employant un fin film de polyéthylène noir maintenu en place par capillarité a été réalisé. Un panneau de mousse et d'aluminium avec défaut de collage a été testé avec succès (fig. 14).

Il est donc possible, par thermographie, d'inspecter des matériaux d'émissivité variables à la recherche d'inclusions, délaminations ou décollements ce qui est très important lors de la fabrication pour éviter, ultérieurement, les accidents pendant la vie utile de ces composants.

C-5 Inspection par couverture complète

Pour tirer un maximum de profit de l'inspection thermographique, il faut limiter le plus possible l'intervention humaine. Idéallement le travail de l'employé se limitera à placer la pièce à inspecter dans le montage et à presser le bouton de départ. La station se charge alors de stimuler la réponse de la pièce en créant à sa surface une perturbation thermique, d'enregistrer cette réponse puis de l'analyser à la recherche d'éventuelles anomalies. Un message apparaît ensuite pour, prévenir de l'acceptation ou du rejet de la pièce inspectée.

Les techniques que nous avons exposées dans cette section jettent les bases d'une telle approche mais ne peuvent prétendre réaliser ce type d'automatisation surtout lorsque les pièces à inspecter sont de dimensions importantes (supérieures à 20x20 cm). En effet les caméras infrarouges actuellement disponibles ont une résolution spatiale relativement limitée. L'accroissement du champ de vision restreint

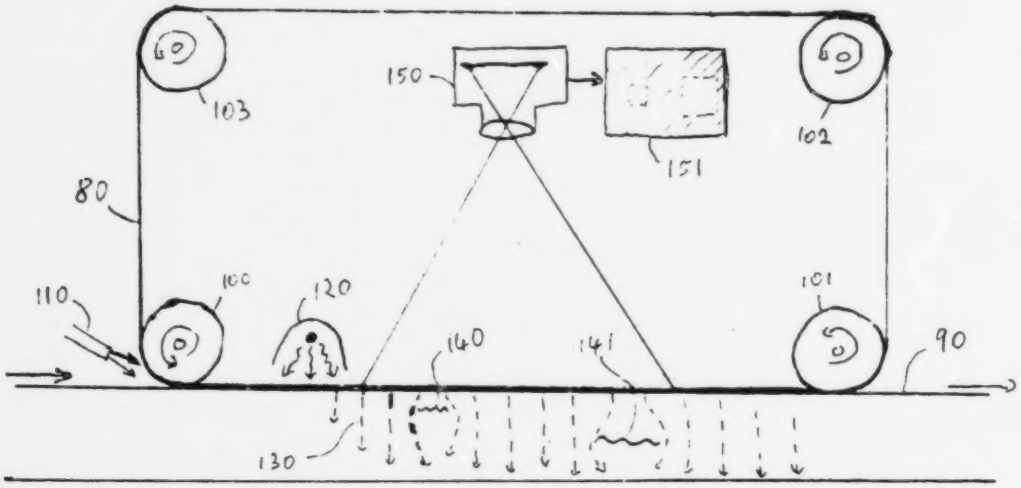
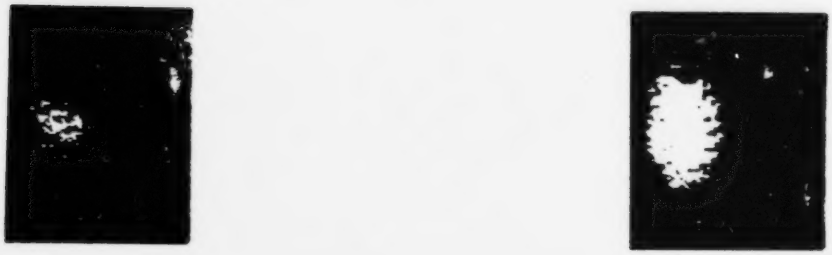


figure 13 Configuration pour l'inspection thermographique de structures de faible émissivité par transfert de l'empreinte thermique sur une pelure de haute émissivité appliquée sur la surface.



a b

figure 14 (a) résultat obtenu en employant une pelure sur le panneau non peint, en réflexion (configuration mobile). Un défaut de collage est visible.
(b) résultat obtenu sur le même panneau peint pour accroître l'émissivité.

alors la taille des objets détectables à des dimensions plus élevées. Pour la détection plus fine, on peut limiter le champ de vision (à 20x20 cm par exemple ce qui permet de visualiser des objets de quelques millimètres) et balayer l'entièreté de la pièce en la déplacant latéralement. Nous avons déjà exposé ce mode d'inspection (section C-3).

Le dépouillement des résultats se faisait cependant image par image ce qui est un procédé lent et requiert l'intervention d'un spécialiste. Nous avons mis au point une technique qui simplifie cette tâche en ramenant le nombre d'images à analyser (jusqu'à 288 tel qu'expliqué à la section B-2) à 1 seule qui représente alors une carte de la pièce complète montrant les défauts internes. Cette technique peut servir aussi pour l'inspection de pièces de dimensions réduites couvrant entièrement le champ de vision (20x20 cm maximum). Elle est alors très utile puisque la manifestation dans le temps de la présence d'un défaut est liée à la profondeur de celui-ci. Si d'éventuels défauts peuvent être présents à différentes profondeurs, on ne peut fixer un instant unique d'observation.

Dans le cas d'une pièce fixe, il s'agit simplement d'effectuer la somme de toutes les images entre deux instants prédéterminés (selon les propriétés thermiques du matériau inspecté).

Dans le cas de la configuration mobile, on reconstitue d'abord les images à chaque instant puis la somme est effectuée en tenant compte du déplacement de la pièce inspectée.

Jusqu'à présent, nous avons vérifié la viabilité de la technique sur différents type d'échantillons: laminés aluminium-mousse, laminés aluminium-aluminium, nid d'abeille d'aluminium, composés de graphite-époxy et plexiglas (comme référence).

Pour maximiser la visibilité des défauts internes, la technique de soustraction spatiale (section C-3) est employée lorsqu'un échantillon sain identique est disponible. La sommation temporelle effectuée agit aussi comme un moyennage pour accroître le rapport signal sur bruit par un facteur égal à la racine carrée du nombre d'images sommées, tout en préservant les contours des entités d'intérêt ce qui ne serait pas le cas d'un lissage ou d'une convolution spatiale. Si la soustraction spatiale s'effectue sur chaque image prise individuellement plutôt que sur la somme des images, les contraintes sur la fenêtre temporelle d'acquisition seront réduites puisque vers la fin on rajoutera à la somme des valeurs pratiquement nulles.

Nous prévoyons, prochainement, élaborer un traitement d'images spécial qui permettra d'obtenir des images binaires semblables à celle de la figure 9 où seuls les défauts sub-

sistent. Nous avons déjà effectué une revue bibliographique de telles techniques de segmentation des images. Les résultats que nous présentons actuellement sont donc bruts, non traités, mais la visibilité des défauts internes est néanmoins claire:

- fig. 15 configuration fixe, plexiglas, 4 défauts (trous) à 2 profondeurs différentes.

- fig. 16 configuration mobile, plexiglas, 6 défauts à 2 profondeurs différentes.

- fig. 17 configuration fixe, graphite-époxy, 1 défaut (inclusion de téflon).

- fig. 18 configuration mobile, graphite-époxy, 2 défauts à 2 profondeurs différentes.

- fig. 19 configuration mobile, aluminium et mousse, 1 défaut (décollement).

- fig. 20 configuration mobile, aluminium-aluminium, 3 défauts à la même profondeur.

Notons que les images "reconstituées" en configuration mobile ont une échelle horizontale très distordue. Ceci est dû au nombre restreint d'images obtenues lors de l'inspection, compte tenu du déplacement latéral de l'échantillon dans le champ de vision de la caméra et de la cadence d'acquisition limitée à 3.8 images / s (c.f. section B-2). Notons également que même à ce niveau expérimental, en employant le système de 'batch files' et de redirection des commandes du DOS exposé à la section B-5, toutes ces images sont obtenues sans intervention outre bien sûr le montage du panneau sur la glissière, le déclenchement de l'acquisition et le choix des paramètres (fixes pour un type de matériau donné: aluminium, graphite-époxy, plexiglas).

Lorsque le procédé de traitement d'images sera bien au point, il sera possible de passer de cette analyse qualitative, limitée à la détection de la présence éventuelle et à la localisation des anomalies internes, à l'analyse quantitative telle qu'exposée à la section C-2. Déjà cependant, l'analyse qualitative est très utile pour effectuer le tri des pièces à inspecter.

D - Inspection thermographique de tuyaux pour évaluer leur corrosion due à la cavitation.

Il s'agit ici d'une application de l'inspection thermographique basée sur les principes de détection exposés précédemment et employant le système d'acquisition présenté à la section B. L'objectif est ici d'évaluer l'amincissement

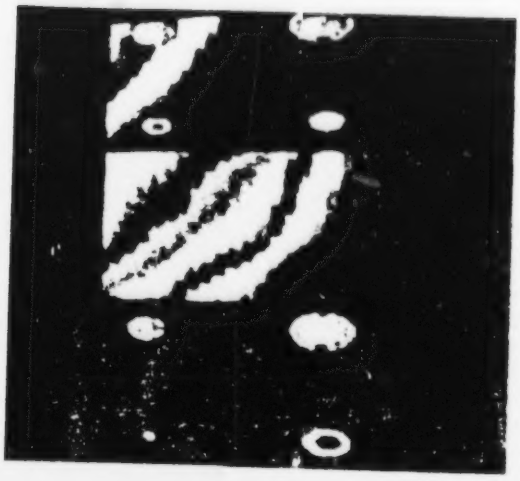


figure 15 Couverture étendue, configuration fixe, panneau de plexiglas. Mise en évidence de 4 défauts (trous) de 2 diamètres différents (ϕ 20 et 10 mm) et à 2 profondeurs (2.25 et 1.12 mm). Image brute, image sur une zone saine et soustraction des 2. Codage en fausses couleurs.

figure 16 Couverture étendue en configuration mobile, panneau de plexiglas. Reconstitution des images ce qui permet de détecter les 6 défauts présents (ϕ 20, 10 et 5 mm; profondeur 1.12 et 2.25 mm). Niveau de gris.

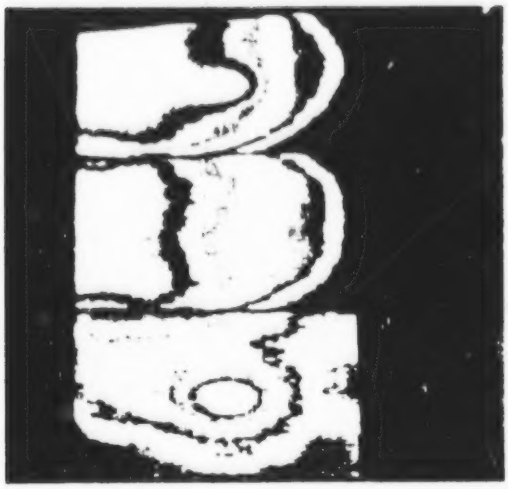


figure 17 Panneau de graphite-époxy avec 1 défaut présent (φ 20 mm, 1 mm prof.). Image brute, sur une zone saine et soustraction des 2.Couverture étendue en configuration fixe.

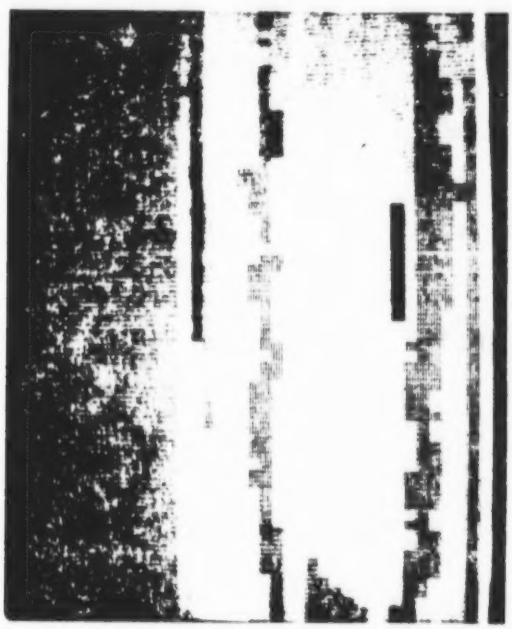


figure 18 Couverture étendue, configuration mobile, panneau de graphite-époxy avec 2 défauts (φ 20mm, 1 & 1.5 mm prof.). Notons la présence d'effets de bord dus au procédé de reconstitution de l'image à partir de la séquence temporelle.

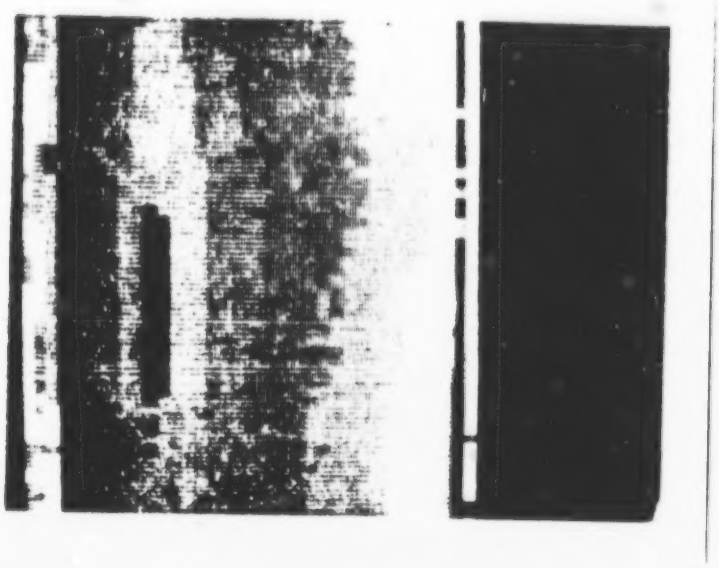


figure 19 Couverture étendue en configuration fixe. Laminé d'aluminium et mousse avec un défaut de collage.

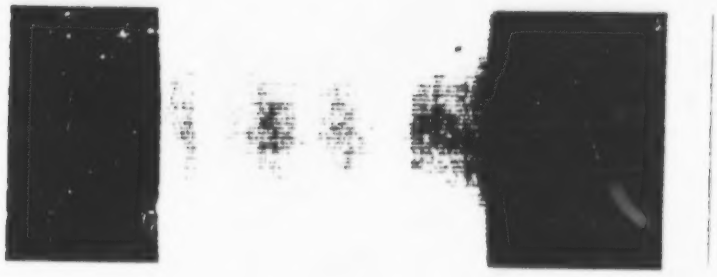


figure 20 Couverture étendue en configuration mobile. Laminé d'aluminium collé sur aluminium avec 3 défauts de collage de largeur variable (10, 5, 3 mm; 1.25 mm prof.) visibles dans la partie collée plus froide au centre de l'image.

des parois dû à la cavitation dans des tuyaux où circulent des liquides ou gaz corrosifs. Ce type de corrosion est plus apparent dans les coudes où la turbulence et les tourbillons favorisent l'érosion des parois.

Pour éviter tout accident, on peut recourir au remplacement statistique des portions de tuyaux jugées potentiellement dangereuses. Cette approche peut s'avérer inutilement coûteuse si le remplacement se révèle superflu. Le laisser-aller n'est pas non plus idéal puisque les conséquences de fuites ou d'explosions peuvent s'avérer désastreuses particulièrement dans l'industrie nucléaire ou pétrochimique. Différentes techniques d'inspection peuvent être déployées pour ne remplacer que les sections fautives. Pensons à l'inspection interne visuelle par boroscope qui est toutefois laborieuse et nécessite le démantellement partiel des installations. Des techniques non destructives telles les ultrasons et les rayons X sont efficaces et financièrement abordables. Ces techniques sont couramment employées dans l'industrie, mais présentent des déficiences telle la lenteur de l'inspection point par point et les problèmes de couplage dans le cas des ultrasons, les problèmes de sécurité pour ce qui est des Rayons X, les problèmes d'accessibilité et la courbure des surfaces. L'inspection thermographique est très attrayante comme nous l'avons exposé plus haut (section C-1).

A la suite d'un changement brusque de température du fluide qui circule, la paroi dont l'épaisseur a été réduite par la corrosion suit les variations de la température interne avec un temps de réponse inférieur au temps requis pour les parois plus épaisses; cette différence temporelle de propagation du front thermique à travers les différentes épaisseurs permet la détection de l'amincissement des parois de tuyaux. Une approche en régime stationnaire où la distribution de température est uniforme, ne permettrait pas une telle analyse. Notons, sans entrer dans les détails, que le temps de propagation permet l'évaluation quantitative des épaisseurs.

La technique d'inspection est donc assez simple, il suffit de faire circuler un fluide dans la portion de tuyau d'intérêt puis de changer brusquement la température de ce fluide (de chaud à froid ou vice versa). Les parois les plus minces verront leur température affectée en premier. Des tests ont été réalisés sur un coude en acier dont 75% de l'épaisseur a été éliminée par cavitation à certains endroits. Les figures 21 et 22 montrent respectivement la pièce corrodée et l'installation d'essai. De l'eau froide (6°C) ou chaude (40°C) peut circuler dans le tuyau avec un débit maximal de 120 l/min. Deux robinets permettent de réaliser des transitions de chaud à froid ou inversement. La direction d'écoulement peut être modifiée sans cependant de changement de réponse de la part du coude métallique. La fi-

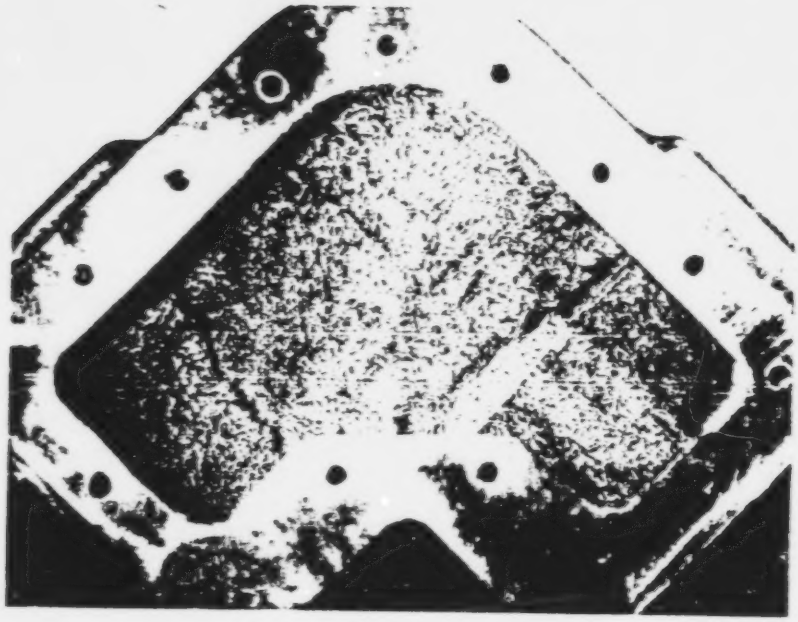


figure 21 Tuyau en acier inoxydable. La partie corrodée est à droite. Les différences d'épaisseurs de parois ne sont pas claires sur cette photo 2D même si 75% de l'épaisseur a disparu par endroit.

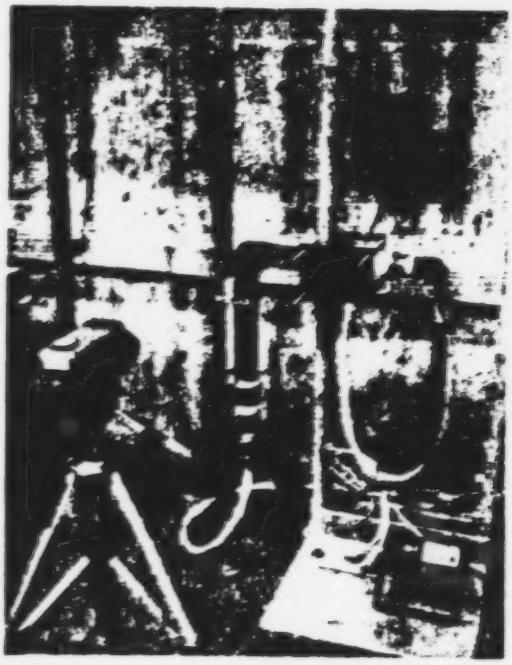


figure 22 Montage expérimental avec la caméra, la tuyauterie et les robinets pour l'alimentation chaude et froide.

gure 23 présente un résultat typique qui révèle la présence des zones corrodées. Après 16.6 s, une zone chaude est toujours visible. Une inspection visuelle à travers la fenêtre de plexiglas vissée à l'arrière du coude révéla qu'il s'agissait en fait d'une portion saine dont l'épaisseur était 4 fois plus grande que les zones endommagées. Comme prévu, en régime stationnaire (figure 23 a et f), aucun dommage n'est apparent.

Les mêmes tourbillons qui endommagent la structure en favorisant la circulation d'eau en certains endroits, accroissent l'effet des transitions de températures et augmentent les contrastes thermiques sur la surface extérieure.

Cette méthode, facile à mettre en oeuvre, est attrayante puisque rapide et ne nécessitant aucun démantellement ni appareillage complexe, il suffit uniquement d'un changement dans la température du fluide qui circule. Cette approche est également pratique: la perturbation thermique étant interne, il n'y a aucun problème de courbure de surface ou de réflexions parasites qui peuvent nuire à la détection comme par exemple dans le cas d'un chauffage par lampe infrarouge.

Si un changement dans la température du flux n'est pas possible, une approche en réflexion peut-être choisie, au prix toutefois d'un contraste thermique réduit. Une source de perturbation thermique (exemple: jet d'air chaud) est employée pour faire se propager uniformément un front thermique dans la pièce à investiguer. Après un certain temps qui dépend de l'épaisseur de la paroi, le front thermique atteint l'interface. A cause de la discontinuité de conductivité thermique à l'interface, le front thermique est partiellement réfléchi à la surface extérieure. Ainsi une différence dans le temps de propagation du front thermique révélera la présence d'une différence d'épaisseur de parois.

L'inspection se passe comme ceci: la tuyau est d'abord uniformément refroidi par circulation d'eau froide, ensuite une projection d'air chaud (jet de 1500 W) sert à provoquer la réponse thermique. Une image typique est présentée à la figure 24, on peut y remarquer la présence des zones endommagées qui correspondent aux zones chaudes. Comme prévu, le contraste est moins bon qu'avec l'approche en transmission, cependant la zone endommagée est clairement visible. Notons enfin que la circulation de l'eau a éte coupée pour obtenir un bon contraste thermique. La même technique peut-être employée avec la circulation d'un fluide chaud et l'emploi d'une source de perturbation froide.

Les techniques exposées ici (en transmission ou en réflexion) apparaissent très propices pour déceler les effets de la corrosion interne dans les tuyaux. Elles sont faciles

figure 23 Inspection thermographique active du conduit corrodé en transmission. L'instant t = 0 s correspond au moment où la température de l'eau d'alimentation est passée de chaude à froide. Évacuation de l'eau sur la droite.

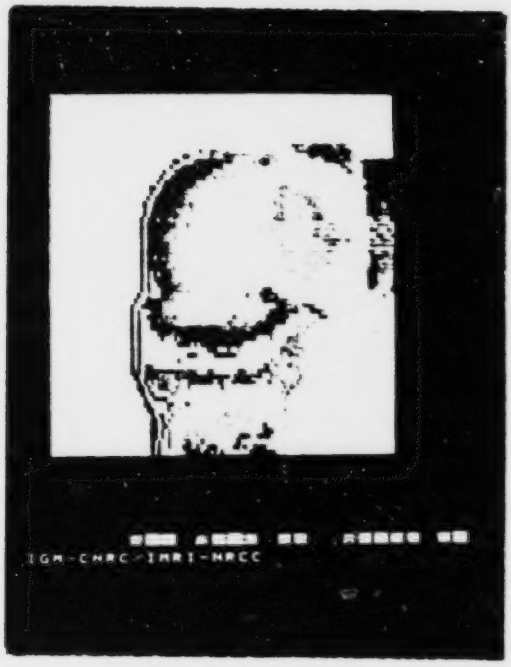


figure 24 Inspection thermographique active du conduit corrodé en réflexion montrant la partie endommagée à droite. Un jet d'air chaud a été employé pour susciter la réponse thermique.

à mettre en oeuvre et ne nécessitent aucune préparation des surfaces si les tuyaux ont une émissivité élevée, autrement, on peut vaporiser une peinture qui pourra être essuyée par la suite. Un des avantages majeur de l'approche thermographique réside dans le contraste thermique très élevé obtenu et détecté de façon très nette dans les régions où les parois sont devenues dangereusement fines.

E - Applications d'un capteur à double longueur d'onde

E-1 Introduction et présentation

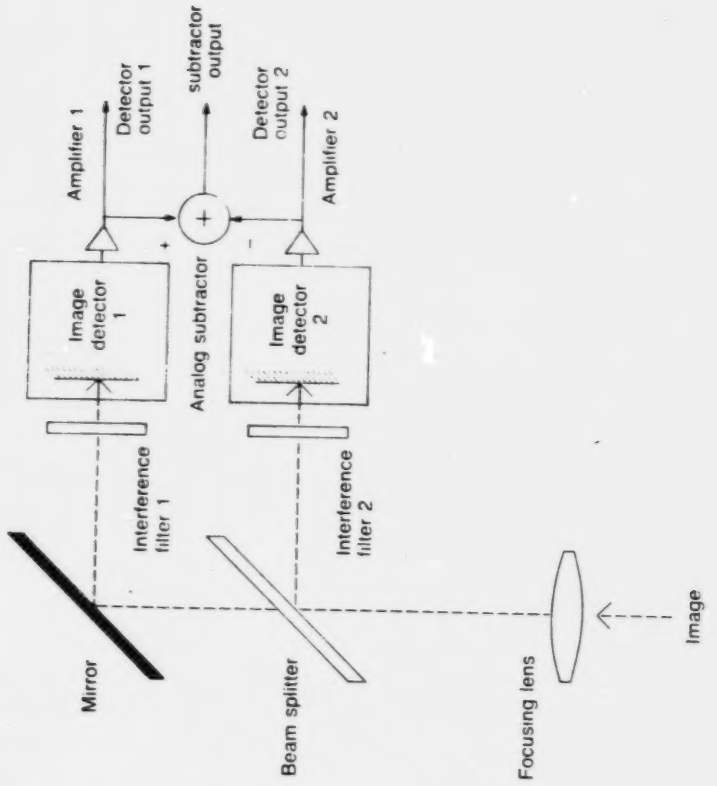
Dans cette section nous présentons un nouveau capteur à deux longueurs d'onde qui trouve des applications aussi bien en thermographie passive (mesure de la température de corps chaud 880 - 1300°C) qu'en vision active pour le suivi de joint en soudage ou bien pour l'inspection de surface.

Le capteur (figure 25) comporte deux détecteurs vidéos qui partagent une optique d'entrée commune au moyen d'une lame dichroïque et d'un miroir. Si les 2 détecteurs sont identiques, correctement placés l'un par rapport à l'autre, que les deux amplificateurs sont correctement réglés et qu'aucun filtre interférentiel n'est employé, la sortie du soustracteur analogique devrait être nulle quelque soit l'image reçue. En fait, la sortie n'est pas vraiment nulle puisque les détecteurs ne sont pas parfaitement identiques, ni parfaitement alignés l'un par rapport à l'autre. Il y a aussi des problèmes d'aberrations optiques et la superposition d'images fantômes causée par l'emploi d'une lame dichroïque d'épaisseur finie. Cependant le niveau de sortie au soustracteur analogique est bien inférieur au niveau de sortie directe de l'un ou de l'autre canal.

L'utilité d'un tel capteur apparaît lorsque des filtres interférentiels sont placées devant chaque détecteur comme nous le verrons dans les paragraphes suivants.

Ce type de capteur où toute la question de la "vision" peut-être répartie entre des systèmes optiques, analogiques et numériques est très intéressant car il permet de maximiser le traitement des images: puisque les images fournies au processeur numérique ont déjà été "épurées", la durée du traitement final par celui-ci sera d'autant plus courte.

Le capteur est refroidi par une circulation d'eau ce qui permet de l'employer près de corps très chauds (exemple: coulée continue d'acier). La stabilisation en température nous assure d'une bonne reproductibilité des résultats. Dans le cas des détecteurs CCD, les images sont aussi moins sujettes au bruit ('leakage current') qui est abaissé de



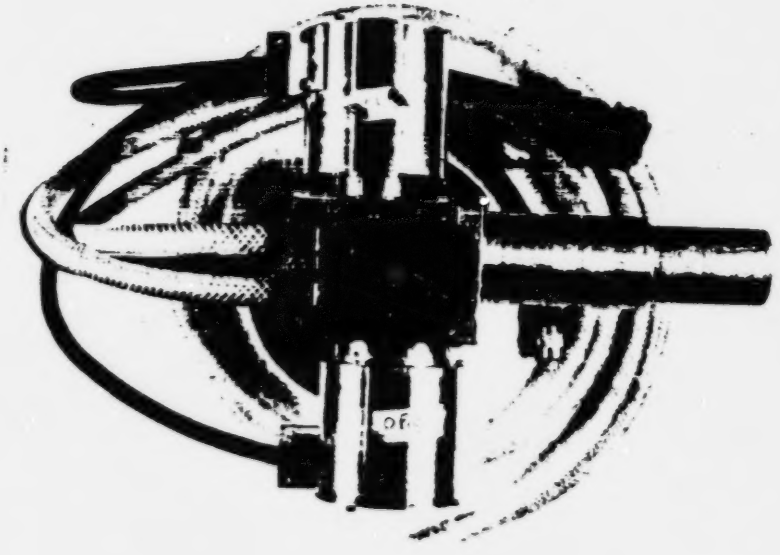


figure 25 Capteur à double longueur d'onde (schéma et photo du montage expérimental).

moitié pour chaque réduction de 8°C de la température de fonctionnement.

Dans le cas de ce premier prototype, nous avons employé des détecteurs vidéos bidimensionnels de 2 caméras CCD Panasonic WV CD-50 dont la réponse spectrale s'étend de 0.35 à 1.1 µm. Dans le cas où le capteur servirait le long d'une ligne de production, l'emploi d'un capteur unidimensionnel de type 'barrette' serait préférable puisque la résolution spatiale pourrait être accrue.

E-2 Accroissement des détails pour l'inspection d'objets dans le spectre visible

Comme nous l'avons mentionné, ce capteur est très versatile, nous présentons ici une de ses applications intéressante.

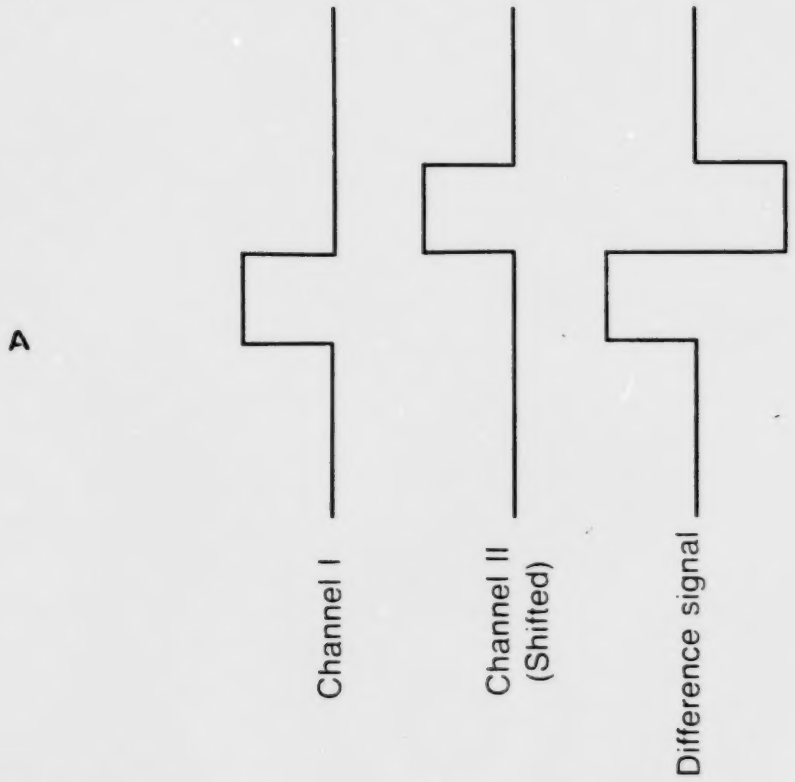
Si après avoir parfaitement aligné les 2 détecteurs, l'un est légèrement déplacé par rapport à l'autre, nous obtenons un accroissement de contraste à la sortie du soustracteur analogique. La figure 26 illustre le principe et présente un exemple: tous les détails ainsi que les contours offrent une visibilité accrue. Ce type de traitement est bien perçu par le système visuel humain.

Notons qu'ici l'inspection s'effectue dans le spectre visible puisque l'illumination est telle, aucun filtre interférentiel n'est donc requis. Un éclairage rasant susceptible de céer des ombrages propices à la détection d'irrégularités de surface n'est pas nécessaire non plus. Les images sont obtenues en temps réel grâce à l'emploi conjugué des systèmes optique et analogique comme nous l'avons mentionné plus haut.

E-3 Vision active pour robot soudeur

Dans cette section nous présentons une application du capteur à deux longueurs d'onde en soudage. La lumière de l'arc constitue une perturbation d'importance pour les systèmes robotisés de suivi de joints. Plusieurs systèmes 'actifs' existent et amenuisent l'effet perturbateur de l'arc par la projection d'un plan de lumière sur le joint à souder. Lorsqu'il est observé en oblique, ce plan de lumière prend la forme du joint. La figure 27 présente un système typique. Notons que même si le rapport signal sur bruit se trouve amélioré par la réduction du domaine spectral, la qualité des images obtenues nécessite l'emploi de savants algorithmes avant que la localisation précise du joint puisse être établie.

Par l'emploi judicieux de 2 filtres interférentiels, notre capteur permet d'obtenir, en temps réel, des images où les perturbations causées par l'arc sont pratiquement



B

figure 26 (a) décalage des signaux des 2 canaux l'un par rapport à l'autre pour l'accroissement des détails.
(b) exemple d'utilisation.

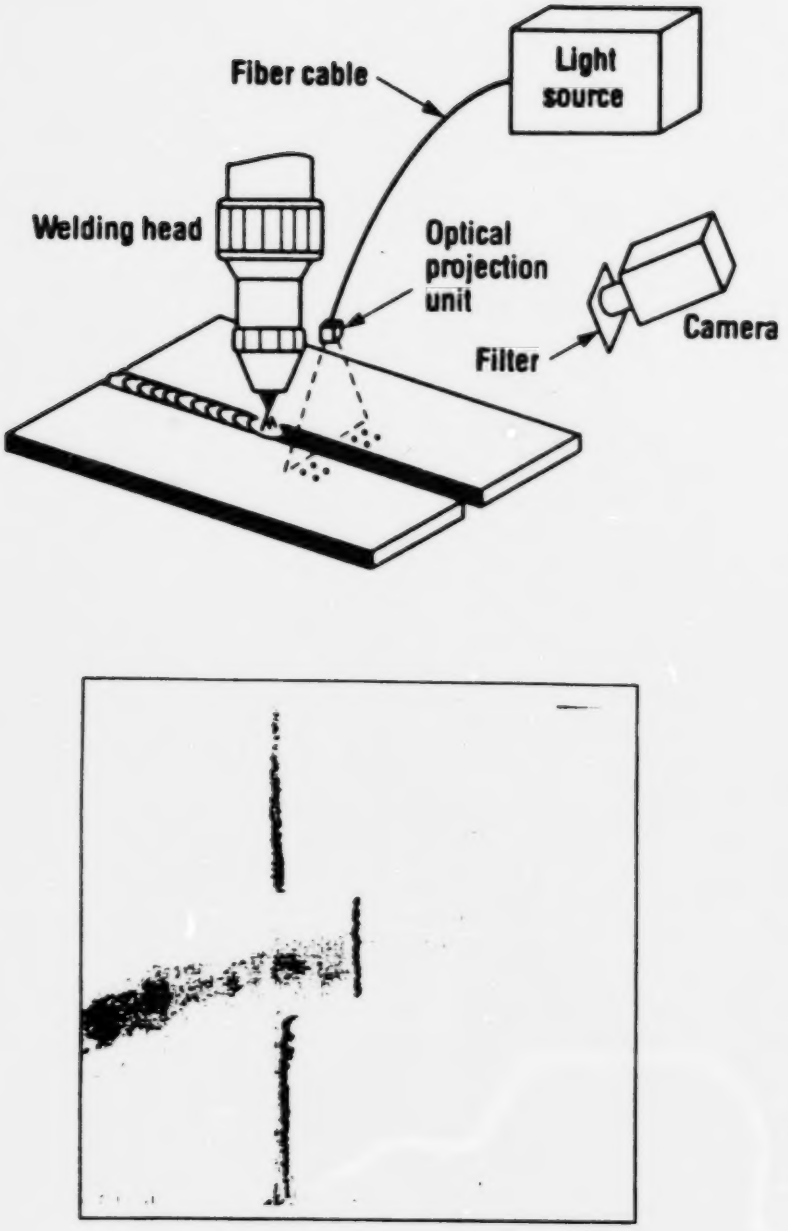


figure 27 Système typique de vision active pour le suivi de joint en soudage.

totalement éliminées. Ceci est obtenu en employant du filtrage spatial associé à de la détection synchrone. Deux filtres interférentiels à largeur de bande limitée sont placés en face des 2 détecteurs tel qu'illustré à la figure 25. Un plan de lumière monochromatique (diode laser) est projeté sur le joint et le capteur correctement réglé et aligné (section E-1) observe la scène. Rappelons que si aucun filtre n'était employé, le signal obtenu du soustracteur analogique serait minimal.

Les 2 filtres inrterférentiels possèdent les mêmes caractéristiques sauf pour ce qui est de leur longueur d'onde centrale. Celle du filtre nº 1 correspond à la longueur d'onde de la lumière monochromatique projetée sur le joint. Celle du filtre nº 2 est choisie aussi près que possible de la longueur d'onde du filtre nº 1, mais suffisamment éloignée pour rejeter complétement la lumière monochromatique. Si la source de lumière monochromatique est éteinte, les images obtenues des 2 détecteurs seront très semblables et la sortie du soustracteur d'images pratiquement nulle. Ceci s'explique puisque le spectre de la lumière de l'arc est très large ainsi, deux bandes spectrales étroites et voisines auront des caractéristiques similaires.

Si le capteur fonctionne normallement, le détecteur nº 1 verra l'image du plan de lumière superposée aux perturbations lumineuses de l'arc; le détecteur nº 2 ne verra que les perturbations et le signal de sortie du soustracteur analogique contiendra essentiellement la lumière de la source monochromatique, c'est-à-dire, la forme du joint à souder. La figure 28 présente des résultats typiques. Notons que le système élimine très bien la lumière de l'arc, l'effet des projections traversant le champ de vision même les cas où il y a superposition avec la forme du joint. Le filtre nº 1 était centré à 832 nm (6.5 nm de largeur à mi-hauteur) et le filtre nº 2 était centré à 810 nm (5 nm de largeur à mi-hauteur). Le transfert en court-circuit, produisant beaucoup d'étincelles et de fumée a été employé. Tel que mentionné précédemment, l'obtention de ces images "épurées" en temps réel est un des avantages majeurs du système.

E-4 Pyrométrie à 2 longueurs d'onde pour l'évaluation de la température

Notre capteur à 2 longueurs d'onde peut également servir pour l'évaluation de la température qui est un des paramètre critique dans beaucoup de procédés industriels. Des appareils sont disponibles pour la mesure à distance tels les thermocouples, les pyromètres à 2 longueurs d'onde ou les caméras infrarouges. Très utiles, ces appareils présentent cepandant des obstacles à leur emploi généralisé: nécessité d'être en contact, mesure localisée à un point,

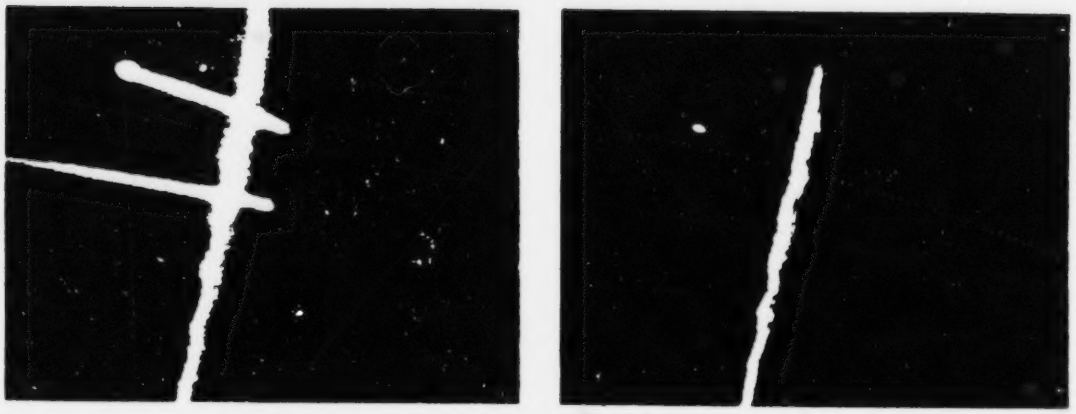


figure 28 Images typiques illustrant le rejet des perturbations lumineuses par le capteur à double longueur d'onde.
(a) image brute.
(b) image soustraite: les perturbations lumineuses ont pratiquement totallement disparus. Seule la ligne de lumière monochomatique projetée sur la plaque subsiste (assemblage sans joint).

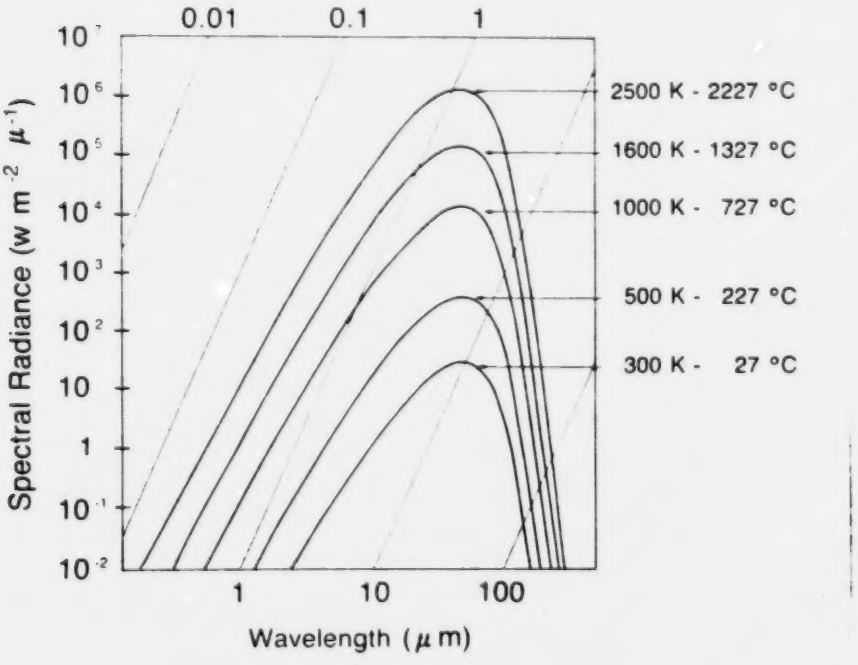


figure 29 Famille de courbes de Planck pour un corps noir.

coût élevé. Pour des applications restreintes où des matériaux à hautes températures émettent suffisamment dans le visible et le proche infrarouge, notre capteur peut être adapté pour la mesure de température en employant les techniques bien connues de pyrométrie à double longueur d'onde.

Sans entrer dans les détails, mentionnons simplement, qu'il s'agit de placer 2 filtres interférentiels différents dans chacun des 2 canaux du capteur comme à la section précédente (E-3). Cette fois, le rapport des signaux obtenus (plutôt que la soustraction) est calculé. La figure 29 présente la famille des courbes de Planck qui définissent l'émission spectrale d'un corps noir (pour lequel l'émissivité $\varepsilon = 1$) en fonction de la longueur d'onde. On peut montrer qu'en tout point le rapport de l'émission spectrale à 2 longueurs d'onde différentes et pour une même température est unique. Cette propriété nous permet d'associer le rapport des signaux obtenus à la température grâce à une courbe de calibration (figure 30). Pour tous les appareils mesurant la radiation émise, la question de l'émissivité est cruciale pour quantifier la température exactement. Si on peut assumer que les émissivités aux deux longueurs d'onde choisies sont identiques ou que le rapport des émissivités (pente) est constant, la courbe de calibration pourra être employée de façon fiable.

Nous avons sélectionné les longueurs d'onde suivantes: 890 nm et 940 nm. Une calibration du capteur a été faite qui permet son emploi sur deux plages de température 880 à 1100 °C et 1100 à 1320 °C en employant un atténuateur optique ou un obturateur pour limiter la saturation à haute température.

Des tests ont été effectués sur différents matériaux et illustrent l'insensibilité de l'appareil aux variations d'émissivité:

Temperature (°C)	Ratio (steel)	Ratio (copper)	Calibrated Ratio (Filament)
820	.59	.55	.54
880	.69	.67	.67
960	.78	.78	.76

La figure 31 montre la bonne correspondance entre la température calculée par le capteur (relié à un PC-AT) et la température d'un filament chauffant relevée par un thermocouple.

La question des réflexions parasites demeure un problème lorsqu'il s'agit de mesurer la température de matériaux dans le voisinage de corps encore plus chauds, tel le cas de la mesure de la température d'acier dans un four

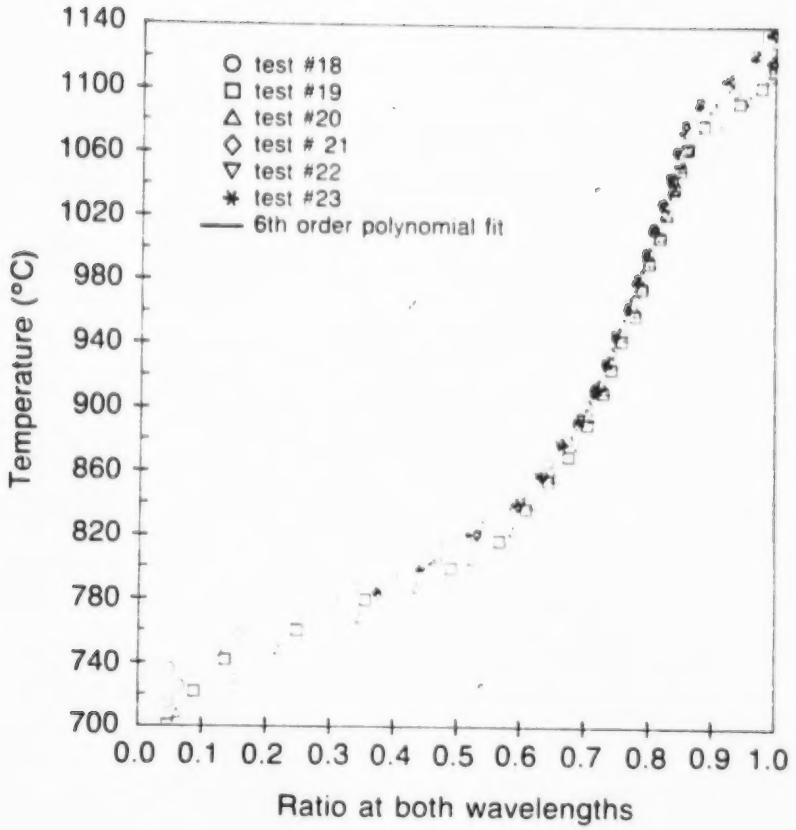


figure 30 Courbe de calibration pour le montage expérimental. Longueurs d'onde n°1: 0.89 µm et n°2: 0.94 µm.

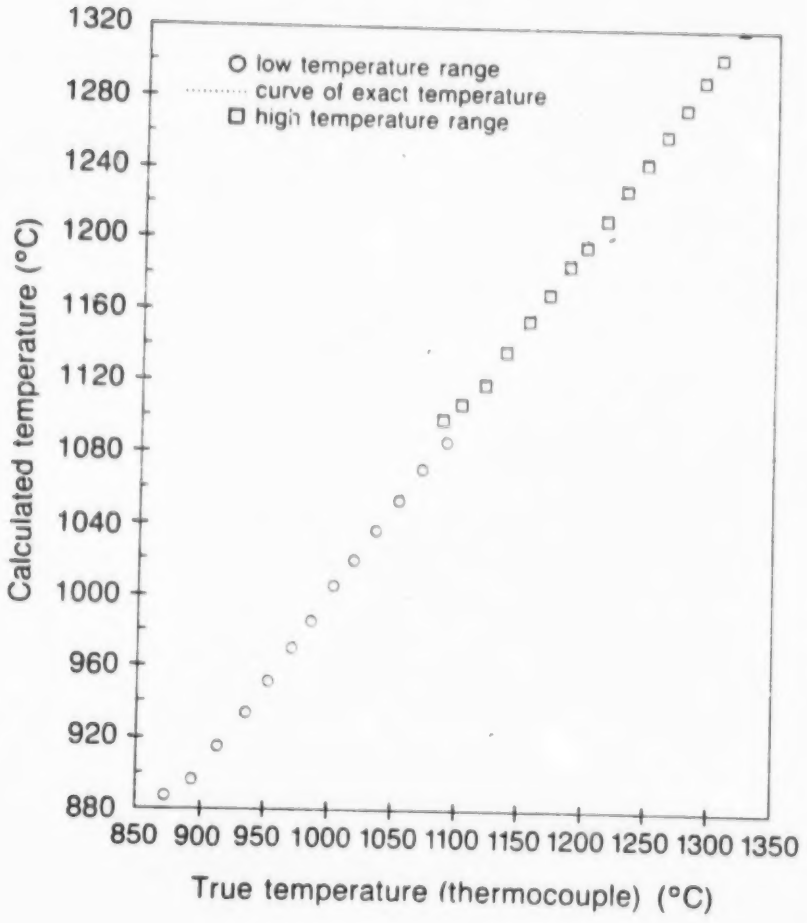


figure 31 Correspondance de ≈ 1% entre la température vraie relevée par thermocouple et la température calculée par le capteur pour un test effectué sur un filament chauffant (80% Ni, 20% Cr).

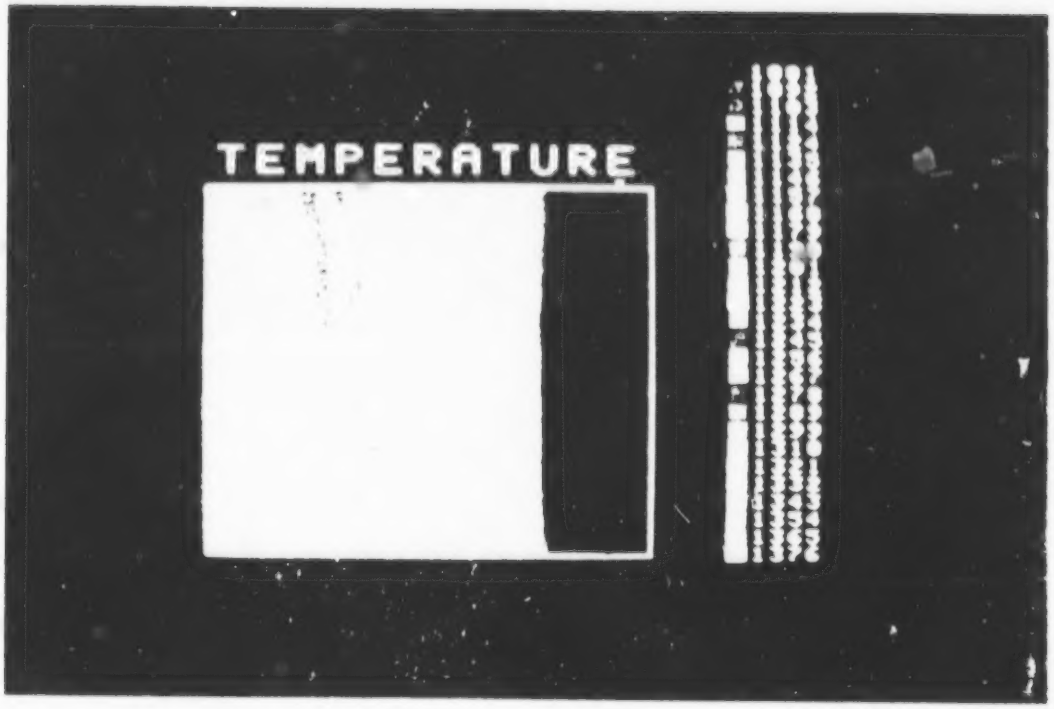


figure 32 Thermogramme typique du bord de la billette (acier de type 1006).

où les réflexions des éléments ou flammes employés pour le chauffage viendront perturber la mesure de la température de l'acier. Ceci est un problème intrinsèque aux systèmes basés sur la mesure de radiation et ne peut-être résolu que par l'emploi d'artifices: caches, mesures simultanées à plusieurs endroits, ... Dans le cas où il n'y a pas de réflexion parasite, notre capteur peut-être employé sans autre complication.

Pour évaluer son fonctionnement, des tests ont été conduits à l'aciérie de Contrecoeur (Sidbec) où la température de 'billette' (20x20 cm) et de 'brame' (150x20 cm) a été enregistrée lors de coulées continues. Puisque l'acier observé se trouve à une température bien supérieure à celle du milieu ambiant, l'influence des réflexions parasites est négligeable. Les gens de l'industrie ont particulièrement apprécié les images 2D (évidemment inhérentes à l'emploi de détecteurs bidimensionnels) qui permettent de localiser aisément la zone mesurée. La figure 32 montre une image typique de la tranche de la billette, un gradient de 150°C est visible entre le centre et le bord qui se refroidi quatre fois plus vite. A ce stade de production, l'acier est encore liquide au centre.

L'emploi d'un PC est également bien perçu puisqu'il permettrait éventuellement, de 'fermer la boucle' et de contrôler l'asservissement du système de refroidissement par jets d'eau. Actuellement ces systèmes sont généralement réglés selon des lois empiriques.

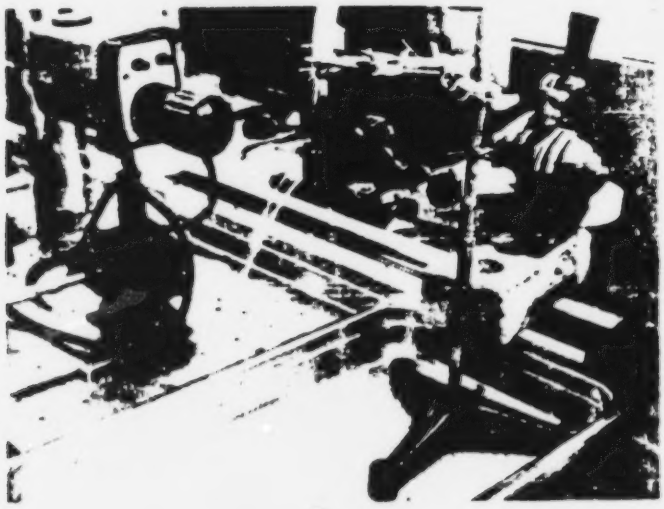
La mesure de la température en aciérie est cruciale puisqu'elle intègre toutes les étapes précédentes et permet de déceler toutes les anomalies (absence de lubrifiant au niveau du répartiteur, orifices des jets d'eau bouchés,...).

Évidemment notre capteur devrait être parfaitement fiable, fabriqué pour limiter au maximum son entretien, être muni d'une calibration automatique et d'un système qui préviendrait le personnel lorsqu'un nettoyage de l'optique serait requis. Notre prototype n'a pas encore atteint une telle maturité, mais nous poursuivons nos efforts dans cette voie.

F - Conclusion

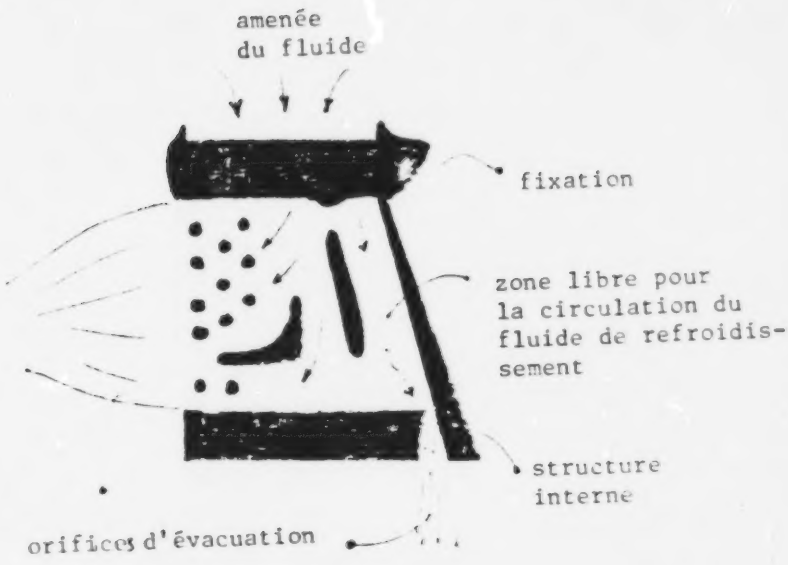
Tout au long de cet exposé nous avons montré les progrès qui ont été réalisés au cours de la dernière année, il reste, bien sûr, encore beaucoup de travail à accomplir, que ce soit au niveau de l'évaluation thermographique quantitative (section C-2), du traitement d'image (section C-5) ou du capteur à 2 longueurs d'onde (section E-4). D'autres applications sont également prévues, telle l'inspection d'ailettes de turbine (projet avec Pratt & Withney) qui emploira une technique similaire à celle

A



B

C



D

figure 33 Inspection d'une ailette de turbine (propulseur Pratt & Withney) à la recherche de défauts de fabrication dans la structure interne servant au refroidissement. Essai préliminaire: (a) photo de l'ailette (un tuyau est soudé pour l'alimentation en eau), (b) montage expérimental, notons les orifices d'évacuation du fluide, (c) image thermique brute obtenue lors d'une transition froid à chaud, (d) détails de construction révélés par l'inpection thermique.

exposée dans le cas de l'évaluation de la corrosion des tuyaux (section D). La figure 33 présente d'ailleurs un résultat préliminaire. Des traitements d'images spécialement adaptés sont prévus.

Cette année nous a permis de bien cerner les problèmes à résoudre et également d'employer nos techniques d'inspection thermographique avec succès.

G - Annexe: travaux pour la période août 1987- juillet 1988

X.Maldague, J.C. Krapez, P. Cielo, Processing of thermal images for the detection and enhancement of subsurface flaws in composite materials, Signal processing and pattern recocgnition in nondestructive evaluation of materials, C.H. Chen éditeur, Springer-Verlag, 1988.

P.Cielo, J.C. Krapez, X. Maldague, Enhanced thermographic imaging for subsurface flaw detection by full-field heating of the inspected surface, Photoacoustic and photothermal phenomena, P. Hess et J. Pelzl éditeurs, Springer-Verlag, 1988.

P.Cielo, X. Maldague, J.C. Krapez, Device for subsurface flaw detection in reflective materials by thermal-transfer imaging, demande de brevet envoyée à SCBEL le 27 octobre 1987.

X.Maldague, P.Cielo, Thermographic inspection of pipes for cavitation corrosion evaluation, demande de brevet envoyée à SCBEL le 22 avril 1988.

X.Maldague, M. Dufour, A dual-imager and its applications for active vision robot welding, surface inspection and two-color pyrometry, présenté à la conférence 'Optical engineering and industrial sensing for advanced manufacturing technologies' organisée par la SPIE, Dearborn, MI, 26-30 juin 1988; sera publié dans les compte-rendus.